

OPTIMIZAÇÃO DA GEOMETRIA DE REPARAÇÕES ADESIVAS POR SOBREPOSIÇÃO SIMPLES EM MATERIAIS COMPÓSITOS

Campilho, R. D. S. G. [1], Moura, M. F. S. F. [1], Pinto, A. M. G. [2], Morais, J. J. L. [3], Domingues, J. J. M. S. [2]

[1] Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal – raulcampilho@hotmail.com

[2] Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto, Portugal – agp@isep.ipp.pt

[3] CITAB/UTAD, Departamento de Engenharias, Quinta de Prados, 5001-801 Vila Real, Portugal

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo numérico relativo à resistência residual de reparações adesivas por sobreposição simples, de laminados de carbono-epóxico. É utilizado o Método dos Elementos Finitos em conjunto com um modelo de dano coesivo em modo misto, baseado no uso indirecto da Mecânica da Fractura, para simular numericamente a iniciação e propagação do dano nas reparações. O modelo numérico é aplicado na identificação das alterações geométricas que maximizam a resistência residual das reparações sujeitas a solicitações de tracção, compressão e flexão.

Palavras-chave: *Método dos Elementos Finitos, Modelo de Dano Coesivo, Reparação, Compósito.*

1. INTRODUÇÃO

Os compósitos de carbono-epóxico (CFRP) têm sido amplamente usados em aplicações aeronáuticas, automóveis e outras, onde é necessária a utilização de materiais de elevada resistência e rigidez específicas. No entanto, as estruturas de CFRP são susceptíveis a sofrer dano, nomeadamente delaminação entre camadas devido a impacto de baixa velocidade. Este tipo de dano pode reduzir substancialmente a resistência das estruturas o que, associado às dificuldades de reciclagem e elevados custos de substituição, torna a sua reparação muito vantajosa. A reparação por ligação adesiva apresenta várias vantagens, comparativamente com as ligações aparafusadas ou rebetadas, nomeadamente o reduzido aumento de peso, as distribuições de tensões mais uniformes, a reduzida alteração na forma e a redução dos custos de manutenção. O método de reparação por sobreposição simples consiste na realização de um furo para remoção do material danificado e posterior colagem de um remendo numa das faces do laminado. Esta técnica de reparação apresenta as vantagens de fácil execução e custos reduzidos. No entanto, normalmente não é conseguida a restituição da resistência inicial do laminado, devido às concentrações de tensões criadas e à excentricidade da carga transmitida.

Hu e Soutis (2000) estudaram reparações adesivas por sobreposição dupla de laminados compósitos de CFRP solicitados à compressão, usando modelos de elementos finitos bi e tri-dimensionais para identificar as áreas críticas em termos de tensões, usando posteriormente um critério baseado na Mecânica da Fractura para prever a resistência das reparações. O

mesmo tipo de reparações foi estudado por Soutis e Duan (1999), que utilizaram um modelo de elementos finitos tridimensional para simular o comportamento mecânico à compressão de um laminado com furo circular, reparado por ligação adesiva com remendos circulares em sobreposição dupla. Foram previstas numericamente as regiões de iniciação do dano. Os autores chegaram à conclusão, comprovando os resultados por uma análise experimental, que o dano se inicia por descolamento do remendo seguido por microencurvatura das fibras a 0° do laminado. Campilho *et al.* (2005) analisaram numericamente, através de modelos bidimensionais, reparações adesivas por sobreposição simples e dupla de laminados de CFRP solicitados à tracção. Observou-se que, para sobreposição simples e dupla, existe um comprimento de sobreposição da reparação a partir do qual não se observa aumento significativo da resistência da reparação, pois a zona central do adesivo deixa de ser solicitada. Para ambas as geometrias constatou-se que as tensões de corte e normais segundo a espessura apresentam magnitude superior nas interfaces laminado/adesivo e adesivo/remendo, significando que provavelmente a rotura ocorrerá nas ou próximo das referidas interfaces.

Este trabalho consiste num estudo numérico relativo à resistência residual de reparações adesivas por sobreposição simples, de laminados de CFRP. É utilizado um modelo de dano coesivo em modo misto, baseado no uso indirecto da Mecânica da Fractura, para simular numericamente a iniciação e crescimento do dano das reparações. Este modelo é aplicado na identificação das alterações geométricas que maximizam a resistência residual das reparações sujeitas a solicitações de tracção, compressão e flexão.

2. MODELO DE DANO COESIVO

Um modelo de dano coesivo em modo misto baseado em elementos de interface de espessura nula é usado para simular o início e propagação do dano. O modelo baseia-se numa relação constitutiva linear (**Fig. 1**) entre as tensões (σ) e os deslocamentos relativos (δ_r). É assim necessário o conhecimento das resistências locais na extremidade da fenda ($\sigma_{u,i}$, $i=I, II, III$) e das taxas críticas de libertação de energia (G_{ic} , $i=I, II, III$). A iniciação do dano é prevista usando o seguinte critério de tensões quadrático

$$\left(\frac{\sigma_I}{\sigma_{u,I}} \right)^2 + \frac{\sigma_{II}}{\sigma_{u,II}} \left(\frac{\sigma_{III}}{\sigma_{u,III}} \right)^2 = 1 \quad \text{if } \sigma_I > 0 \quad (1)$$

$$\left(\frac{\sigma_{II}}{\sigma_{u,II}} \right)^2 + \frac{\sigma_{III}}{\sigma_{u,III}} \left(\frac{\sigma_I}{\sigma_{u,I}} \right)^2 = 1 \quad \text{if } \sigma_I = 0$$

onde σ_i , ($i=I, II, III$) representa a tensão num dado ponto de integração do elemento de interface no modo respectivo. O modo I representa o modo de abertura e os modos II e III os de corte. A propagação do dano é simulada pelo critério energético linear

$$\frac{G_I}{G_{Ic}} + \frac{G_{II}}{G_{IIc}} + \frac{G_{III}}{G_{IIIc}} = 1 \quad (2)$$

A área do triângulo mais pequeno da **Fig. 1** representa a energia libertada em cada modo, enquanto que a área do triângulo maior corresponde à respectiva energia crítica de fractura. Quando a equação (2) é satisfeita, há propagação de dano e as tensões são anuladas, com a excepção das normais compressivas. Os índices “o” e “u” referem-se aos deslocamentos de início e propagação do dano, respectivamente, e o índice “m” representa o modo misto. Uma explicação detalhada do modelo descrito pode ser encontrada em Campilho *et al.* (2005).

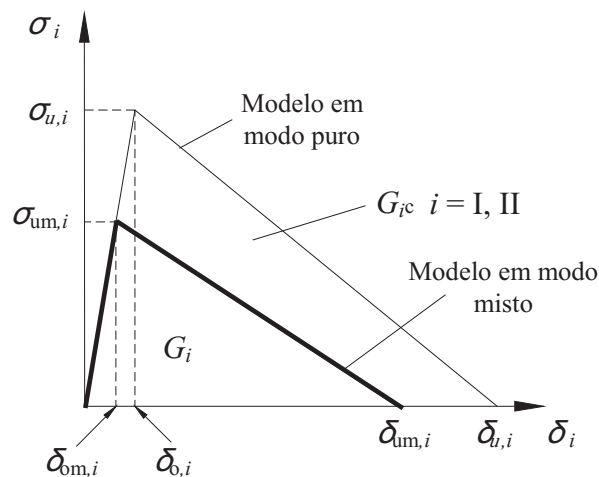


Fig. 1 - Lei de dano em modo puro e modo misto.

3. ESTUDO NUMÉRICO

Neste estudo numérico, como alterações geométricas foram testados a utilização de chanfro nas faces interior e exterior do remendo, enchimento do furo do laminado com adesivo, filetes de diferentes formas e dimensões na Extremidade Exterior do Comprimento de Sobreposição (EECS), chanfro nas faces interior e exterior do laminado, bem como combinações destas alterações. Na previsão dos modos de rotura e da resistência residual das reparações é utilizado o modelo de dano coesivo apresentado no capítulo 2. O trabalho numérico desenvolvido consiste numa análise tridimensional não linear geométrica e material, usando o software ABAQUS[®] com elementos sólidos de 8 e 6 nós, incorporando os elementos finitos de interface em planos distintos para simulação da iniciação e propagação do dano. A **Fig. 2** ilustra a geometria e dimensões da reparação por sobreposição simples.

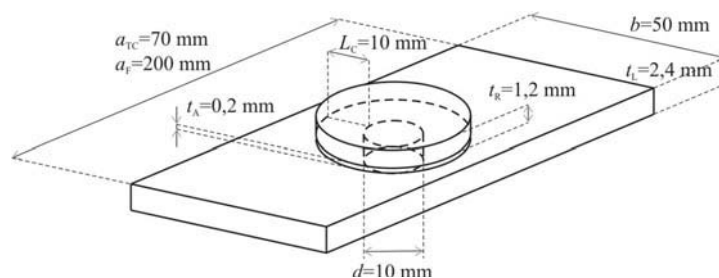


Fig. 2 - Geometria e dimensões da reparação por sobreposição simples.

As condições de simetria impostas permitiram considerar apenas $\frac{1}{4}$ do laminado (planos de simetria **A** e **B** na Fig. 3). As condições fronteira para as solicitações de tracção e compressão (Fig. 3 a) consistiram na restrição do movimento nos planos **A**, **B** e **C** (quando aplicável) na respectiva direcção normal e na aplicação de um deslocamento na extremidade do modelo. Sob flexão, foram considerados comprimentos entre cilindros de carregamento (L') e cilindros de apoio (L) de 60 e 180 mm, respectivamente. O comprimento e , correspondente à distância entre os cilindros de apoio e a extremidade do laminado, é igual a 10 mm. Foram modelados cilindros com um diâmetro de 4 mm e considerados dois comprimentos do laminado distintos: a_{TC} (solicitações de tracção e compressão) e a_F (solicitação de flexão). Esta distinção justifica-se pela necessidade de evitar encurvadura sob compressão e garantir que os cilindros de deslocamento não interferem com a zona da reparação, assegurando um momento constante nes-

sa zona, sob uma solicitação de flexão. As propriedades dos laminados e remendos (SEAL[®] Texipreg HS160RM), do adesivo utilizado (Araldite[®] 420) e dos elementos de interface foram obtidas a partir de trabalhos prévios (Campilho *et al.*, 2005, Campilho *et al.*, 2008a). Foi usada a mesma lei coesiva para os modos II e III. As sequências de empilhamento dos laminados e remendos são $[0_2, 90_2, 0_2, 90_2]_S$ e $[0_2, 90_2]_S$, respectivamente. Os elementos de interface foram colocados nos seguintes planos, para a reparação sem alterações geométricas: na interface entre o laminado e o adesivo, a meio da espessura do adesivo e na interface entre o adesivo e o remendo. Foram considerados elementos de interface em planos adicionais, de acordo com cada alteração geométrica.

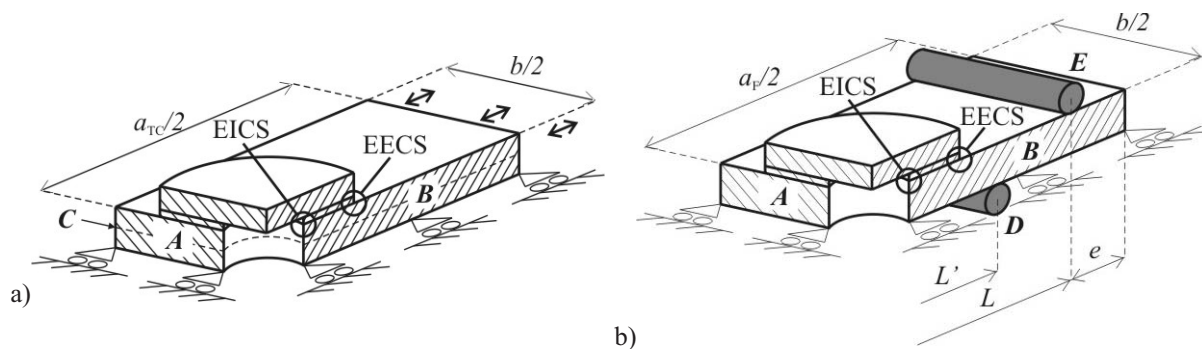


Fig. 3 - Condições fronteira e de simetria sob solicitações de tracção e compressão (a) e flexão em quatro pontos (b).

3.1 Análise de tensões

A Fig. 4 a) e b) representa as tensões normais segundo a espessura e de corte, respectivamente, para a reparação sem alterações geométricas, sob um deslocamento de tracção de 4 μm . Ambas são mais elevadas no plano de simetria longitudinal da reparação (plano **B** na Fig. 3), apresentando os seus valores máximos nas extremidades da sobreposição. Resultados semelhantes foram obtidos para as solicitações de compressão e flexão.

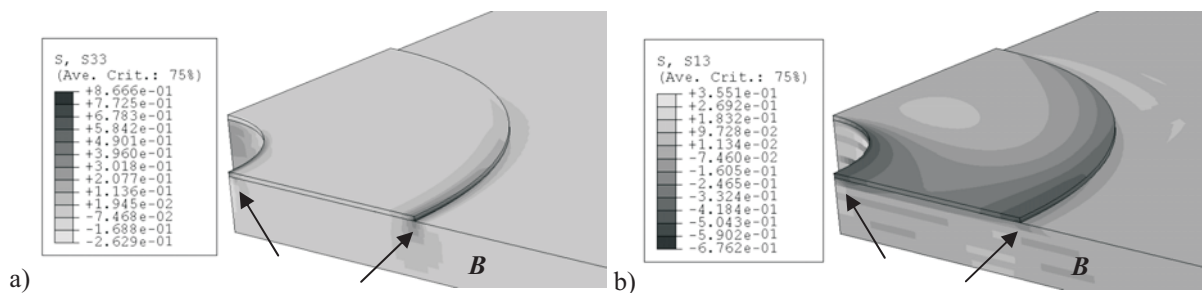


Fig. 4 - Distribuição de tensões normais segundo a espessura (a) e de corte (b) na zona da reparação (solicitação de tracção).

3.2 Alterações geométricas

A Fig. 5 mostra em detalhe as malhas das alterações geométricas de base estudadas. A Fig. 6 representa um resumo da resistência residual das reparações (P_C) por sobreposição simples sujeitas às três solicitações em análise, normalizada pela resistência de uma reparação sem alterações geométricas (P_0), em função das dimensões da alteração geométrica respectiva. P_C é a carga nas extremidades da reparação correspondente à iniciação do descolamento do remendo, embora o laminado ainda possa suportar esforços após descolamento do remendo (Hu e Soutis, 2000). A seguir são estudadas em detalhe cada uma das alterações geométricas.

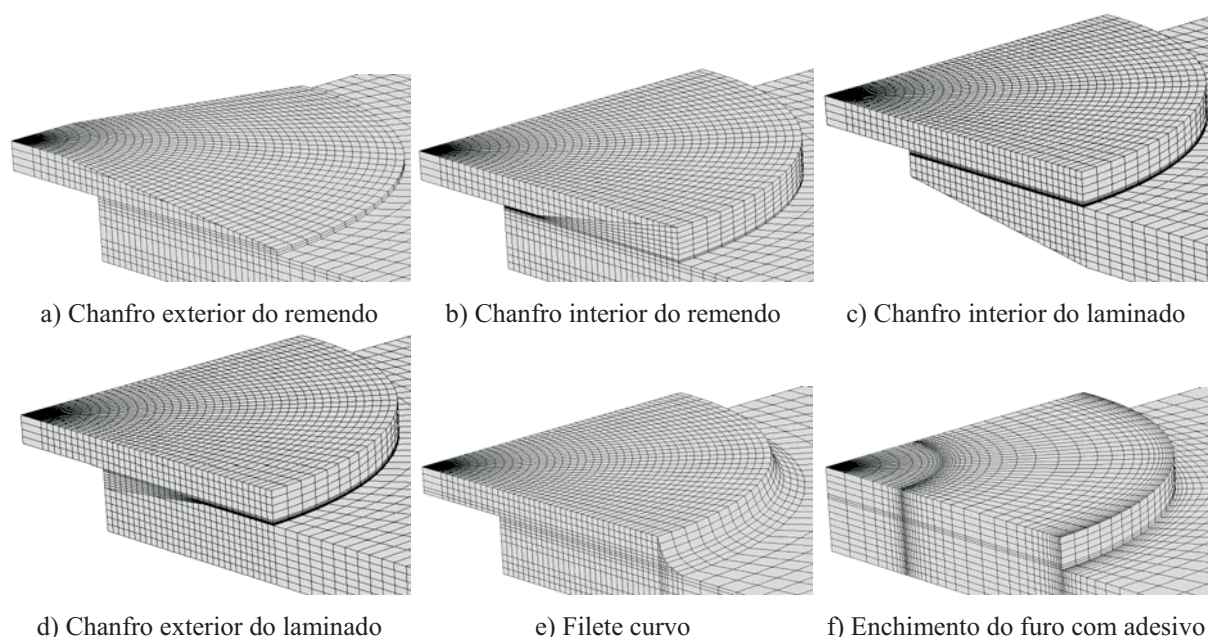


Fig. 5 - Alterações geométricas analisadas.

Chanfro exterior do remendo

Esta modificação tem como objectivo reduzir os picos de tensões normais segundo a espessura na EECS (Mortensen e Thomsen, 2002, Campilho *et al.*, 2005), aumentando eventualmente a resistência residual da reparação. Foi considerada uma inclinação do chanfro de 1/10 (Hu e Soutis, 2000, Campilho *et al.*, 2008b) e reduções da espessura de remendo de 0,3, 0,6, 0,9 e 1,2 mm, a última englobando a totalidade da espessura do remendo (Fig. 5 a). Esta modificação geométrica causa um aumento significativo de resistência (Fig. 6 a) sob solicitações de tracção (17,4%) e flexão (45,2%), para o chanfro de 1,2 mm, o que pode ser justificado pela redução da rigidez do remendo na zona de iniciação do dano (EECS). Em compressão, observa-se um aumento de resistência de 4,6% com esta alteração geométrica.

Chanfro interior do remendo

Esta modificação, que leva a um aumento localizado da espessura da camada de adesivo, também foi estudada no sentido de diminuir os picos de tensões normais segundo a espessura na EECS. Foram estudadas reduções de espessura do remendo de 0,3, 0,6, 0,9 e 1,2 mm, com uma inclinação de 1,5/10 (para permitir que toda a espessura do remendo fosse considerada). A Fig. 5 b) representa a malha da reparação com um chanfro de 1,2 mm. Esta alteração geométrica também é benéfica (Fig. 6 b). De facto, observa-se um aumento exponencial sob tracção, chegando a 8,5% para o chanfro de maiores dimensões. Em compressão, observa-se um aumento de aproximadamente 5,7%, independentemente das dimensões do chanfro. Os melhores resultados são obtidos à flexão (aumento de resistência de 15,0% usando um chanfro de 0,9 mm).

Chanfro interior do laminado

Foram estudados chanfros com reduções na espessura do laminado de 0,3, 0,6, 0,9, 1,2 e 1,5 mm e uma inclinação de 1,5/10. A Fig. 5 c) apresenta a malha do modelo com 1,5 mm. Observa-se uma redução da resistência residual sob cargas de tracção e compressão (Fig. 6 c), que é explicada por uma redução da área resistente do laminado causada por esta alteração geométrica. À flexão, regista-se um aumento de resistência de 11,7% usando o chanfro de 0,3 mm e uma diminuição gradual para valores superiores.

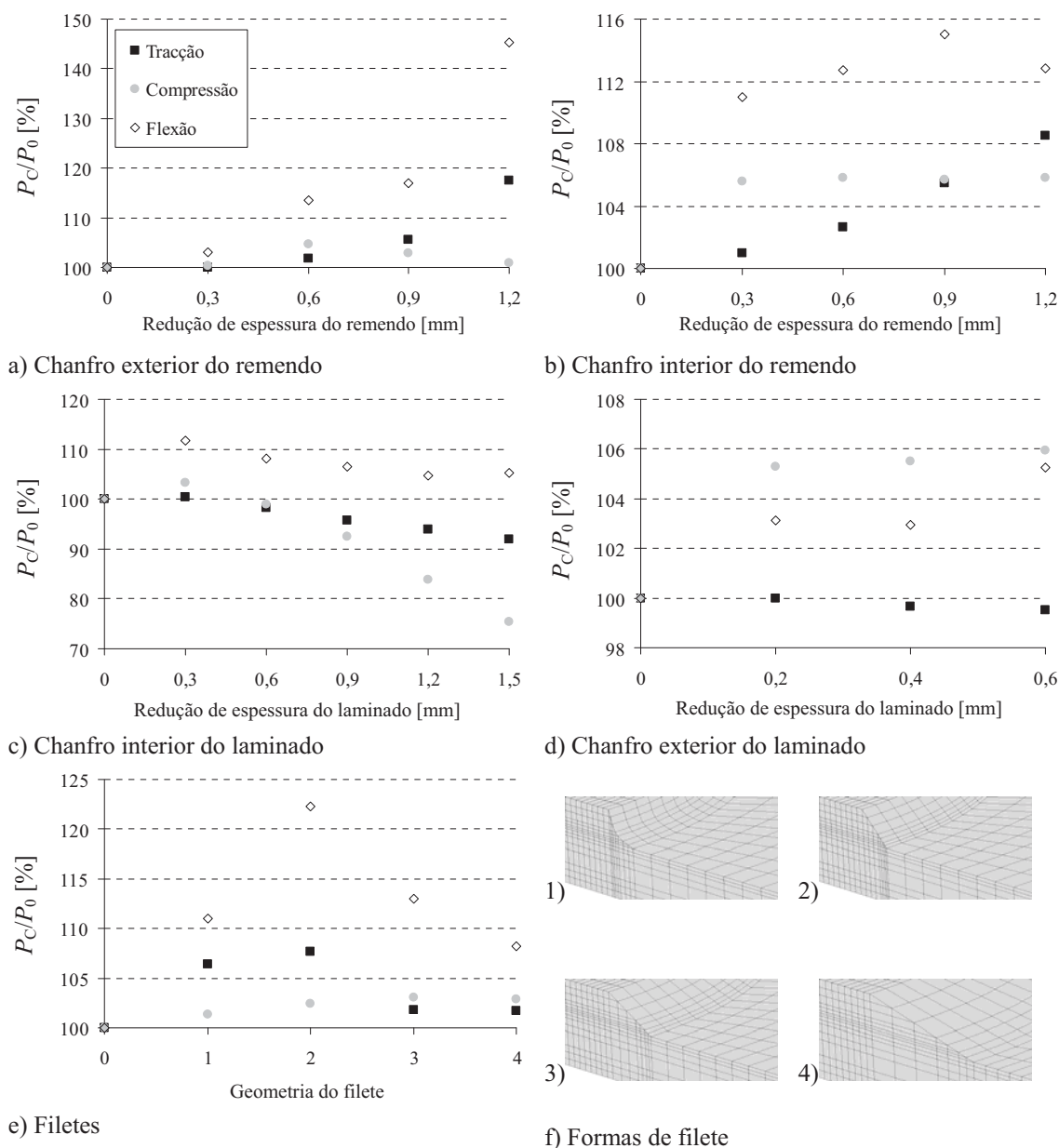


Fig. 6 - Resistência normalizada em função das alterações geométricas.

Chanfro exterior do laminado

Esta alteração geométrica, que leva a um aumento localizado da espessura de adesivo na Extremidade Interior do Comprimento de Sobreposição (EICS), foi estudada considerando reduções da espessura do laminado de 0,2, 0,4 e 0,6 mm e uma inclinação de 1,5/10. A Fig. 5 d) evidencia a malha com um chanfro de 0,6 mm. Esta modificação causa uma redução ligeira de resistência sob uma solicitação de tracção (Fig. 6 d). Por outro lado, observa-se um aumento de resistência razoável sob compressão (6,0%) e flexão (5,3%).

Filetes

A utilização de filetes de adesivo suprime as singularidades de tensões nas arestas das reparações, aumentando a sua resistência (Hildebrand, 1994, Tsai e Morton, 1995, Campilho *et al.*, 2008a). Neste caso, os modelos numéricos incluem elementos de interface adicionais nas interfaces laminado/filete e filete/remendo. Foram consideradas quatro formas distintas para os filetes: um filete curvo (Fig. 5 e) e filetes lisos com ângulos de 45, 30 e 15° (Fig. 6 f). Os filetes incluem a totalidade da espessura do remendo, minimizando as tensões normais

segundo a espessura na proximidade da EECS (Cheuk e Tong, 2002). Observa-se que a utilização de filetes é sempre aconselhável, independentemente da sua forma ou do tipo de solicitação (Fig. 6 e). Os melhores resultados são obtidos para uma solicitação de flexão e de uma maneira geral usando um filete recto a 45°. Apenas em compressão o filete de 30° é o mais aconselhável. Os resultados obtidos estão em concordância com o trabalho numérico de Belingardi *et al.* (2002).

Enchimento do furo com adesivo

O enchimento com adesivo do furo no laminado correspondente à remoção do material danificado também foi testado neste trabalho. Soutis e Duan (1999) verificaram que a resistência à compressão de reparações tridimensionais por sobreposição dupla aumenta com esta modificação. A malha utilizada encontra-se na Fig. 5 f). Foram colocados elementos de interface adicionais entre o adesivo no furo e o laminado e remendo. Foi obtida uma redução de resistência de 1,2% à tracção, que pode ser explicada por uma rotura na interface entre o adesivo do furo e o laminado antes da rotura na camada de adesivo (Campilho *et al.*, 2008c). À compressão e flexão obteve-se aumentos de resistência de 5,8 e 17,4%, respectivamente, uma vez que em ambos os casos a iniciação de dano se dá na EECS, ao mesmo tempo que o adesivo do furo ainda se encontra a transferir esforços (Campilho *et al.*, 2008c).

Combinações de alterações geométricas

As alterações geométricas mais eficazes em sobreposição simples foram combinadas no sentido de maximizar a resistência das reparações. À tracção, observou-se que o chanfro exterior e interior do remendo (incluindo a totalidade da espessura do remendo) e um filete liso de 45° eram as soluções mais vantajosas. Como tal, foi construída uma combinação com o chanfro interior do remendo de 1,2 mm e o filete liso de 45°, obtendo-se um aumento de resistência de 27,7%. Sujeitas a uma solicitação de compressão, a resistência residual das reparações também aumenta com as modificações acima referidas (embora algumas dimensões óptimas sejam diferentes) e ainda usando chanfros interior e exterior do laminado e enchendo o furo com adesivo. A primeira combinação incluiu um filete liso de 30° (forma óptima para a solicitação de compressão), um chanfro interior do remendo de 1,2 mm, um chanfro exterior do laminado de 0,2 mm e um chanfro interior do laminado de 0,3 mm, tendo-se observado um aumento de resistência de 3,8%. Outra combinação considerando um filete liso de 30°, um chanfro interior do remendo de 1,2 mm e com enchimento do furo com adesivo foi testada. Como foi obtido um aumento de resistência de 6,8%, esta combinação foi considerada a solução óptima neste caso particular. Sob uma solicitação de flexão, todas as alterações são benéficas. Registou-se um aumento de resistência de 49,3% combinando um chanfro exterior do remendo de 1,2 mm com o enchimento do furo com adesivo. Combinando um chanfro exterior do remendo de 1,2 mm, um chanfro exterior do laminado de 0,2 mm e um chanfro interior do remendo de 0,3 mm obteve-se a solução mais eficaz para a solicitação de flexão (aumento de resistência de 58,3%).

4. CONCLUSÕES

Foi apresentado um trabalho numérico relativo à resistência residual de reparações adesivas por sobreposição simples de laminados de carbono-epóxico. Para modelar numericamente o comportamento mecânico das reparações, foi utilizado um modelo de dano coesivo em modo misto baseado no uso indirecto da Mecânica da Fractura. Este modelo foi aplicado na identificação das alterações geométricas que maximizam a resistência residual de reparações tridimensionais por sobreposição simples sujeitas a solicitações de tracção, compressão e flexão. De uma forma geral, mostrou-se que é benéfica a alteração geométrica das reparações estudadas, para todas as solicitações consideradas neste trabalho. Os melhores resultados

foram obtidos à flexão, sendo que as alterações geométricas mais significativas foram obtidas com os chanfros interior e exterior do remendo e com a utilização de um filete. Diferentes combinações destas alterações geométricas levaram a aumentos de resistência de 27,7% (tração), 6,8% (compressão) e 58,3% (flexão). Embora estes resultados dependam das propriedades dos materiais, sequências de empilhamento e parâmetros geométricos da reparação, concluiu-se que a metodologia numérica apresentada simula os diferentes modos de rotura destas reparações e permite obter directrizes no sentido de maximizar a resistência das reparações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BELINGARDI *et al.* **Investigating the effect of spew and chamfer size on the stresses in metal/plastics adhesive joints.** International Journal of Adhesion & Adhesives, v. 22, p. 273-282, 2002.

CAMPILHO *et al.* **Modelling single and double-lap repairs on composite materials.** Composites Science and Technology, v. 65, p. 1948-1958, 2005.

CAMPILHO *et al.* **Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs.** International Journal of Solids and Structures, v. 45, p. 1497-1512, 2008a.

CAMPILHO *et al.* **Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP laminates under different geometric changes.** International Journal of Adhesion and Adhesives, doi:10.1016/j.ijadhadh.2008.03.005, 2008b.

CAMPILHO *et al.* **Computational modelling of the residual strength of repaired composite laminates with different geometries using a cohesive damage model.** Journal of Adhesion Science and Technology, v. 22, p. 1565-1591, 2008c.

CHEUK, P.T. e TONG, L. **Failure of adhesive bonded composite lap shear joints with embedded precrack.** Composites Science and Technology, v. 62, p. 1079-1095, 2002.

HILDEBRAND, M. **Non-linear analysis and optimization of adhesively bonded single lap joints between fibre-reinforced plastics and metals.** International Journal of Adhesion & Adhesives, v. 14, p. 261-267, 1994.

HU, F.Z. e SOUTIS, C. **Strength prediction of patch repaired CFRP laminates loaded in compression.** Composites Science and Technology, v. 60, p. 1103-1114, 2000.

MORTENSEN, F. e THOMSEN, O.T. **Analysis of adhesive bonded joints: a unified approach.** Composites Science and Technology, v. 62, p. 1011-1031, 2002.

SOUTIS, C. e DUAN, D.M. **Compressive behaviour of CFRP laminates repaired with adhesively bonded external repairs.** Composite structures, v. 45, p. 289-301, 1999.

TSAI, M.Y. e MORTON, J. **The effect of a spew fillet on adhesive stress distributions in laminated composite single-lap joints.** Composite Structures, v. 32, p. 123-131, 1995.